

# Новая технология PT IGBT

## против мощных полевых МОП-транзисторов

Последнее время пристальное внимание разработчиков в области силовой электроники сконцентрировано на стремительном развитии последних технологий биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и, в частности, на возможности их использования как недорогой альтернативы мощным полевым МОП-транзисторам. В данной статье приводится сравнение динамических характеристик, потерь на переключение и проводимости мощных полевых МОП-транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором PT (Punch Through) новой технологии производства IGBT компании Advanced Power Technology — Power MOS 7®. Также рассматривается использование этих транзисторов в некоторых типовых наиболее распространенных схемах включения.

Инна Щукина,  
Михаил Некрасов

mik@icquest.ru

### О компании Advanced Power Technology

Диапазон продукции Advanced Power Technology достаточно широк и объединяет в себе различные направления. Это дискретные устройства — биполярные транзисторы с изолированным затвором, мощные полевые транзисторы, диоды на основе барьера Шоттки, диоды с быстрым восстановлением, а также модульные сборки на основе кристаллов дискретных элементов. Кроме того, АРТ выпускает устройства с повышенными эксплуатационными характеристиками для военной, аэрокосмической промышленности и мощные высокочастотные транзисторы.

Сегодня мы постараемся поподробнее рассмотреть одно из направлений силовых полупроводниковых приборов — линию дискретных биполярных транзисторов с изолированным затвором PT IGBT, выполненных по новой технологии Advanced Power Technology Power MOS 7.

### Структура PT IGBT

Всем известно, что биполярные транзисторы с изолированным затвором обладают преимуществами легкого управления полевыми МОП-транзисторов и низкими потерями проводимости, характерными для биполярных транзисторов. Традиционно IGBT используют в применениях, где необходимо работать с высокими токами и напряжениями. Сегодня Advanced Power Technology представляет новое поколение PT IGBT, которое позволяет сбалансировать потери на переключение и потери

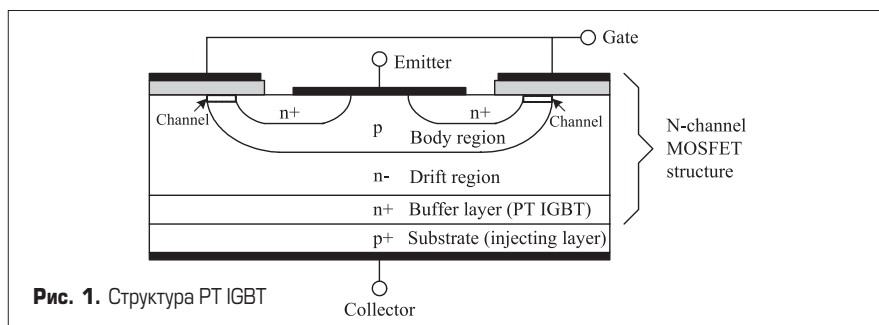
проводимости и использовать эти транзисторы в области высоких частот, где обычно применяются полевые МОП-транзисторы, одновременно обеспечивая высокий КПД.

Как видно из рис. 1, структура PT IGBT практически идентична структуре других топологий биполярных транзисторов с изолированным затвором.

Особенностью структуры PT IGBT является наличие комбинации инжектирующего слоя  $p^+$  и буферного слоя  $n^+$ . Благодаря высокой инжектирующей способности слоя  $p^+$  буферный слой контролирует коэффициент передачи транзистора при помощи ограничения числа дырок, которые были изначально введены в область дрейфа. В связи с тем что время жизни неосновных носителей в буферном слое намного ниже, чем в области дрейфа, буферный слой поглощает захваченные дырки в момент выключения.

В дополнение к работе буферного слоя  $n^+$ , «хвостовой» ток в PT IGBT контролируется ограничением общего времени жизни неосновных носителей до того, как они рекомбинируют. Это свойство называется управлением временем жизни неосновных носителей. Облучение электронами в процессе производства создает дополнительные рекомбинационные центры во всем пространстве кристалла кремния, которые существенно уменьшают время жизни неосновных носителей и, следовательно, «хвостовой» ток. Дырки быстро рекомбинируют даже при отсутствии напряжения в устройстве, характерном для режима мягкого переключения.

Устройства нового поколения PT IGBT Power MOS 7 выделяются среди прочих IGBT высокой скоростью переключений. Этому способствует металлическая полосковая топология затвора. В результате применения данной топологии устройства обладают очень низким внутренним эквивалентным сопротивлением затвора (EGR) — доли Ом — гораздо меньшим, чем у устройств с поликремниевым затвором. Низкое сопротивление затвора дает возможность быстрее осуществлять переключения и, следовательно, уменьшить потери. Полосковая металлическая топология обеспечивает равномерное и быстрое возбуждение затвора, уменьшая нагрев при переходных процессах и повышая надежность. Наконец, полосковая струк-



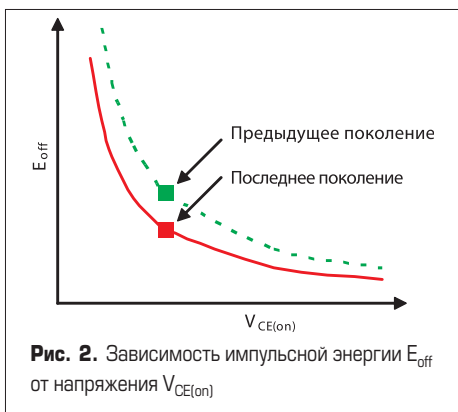
тура затвора более устойчива к дефектам, которые неизбежно возникают во время производства, и улучшает выносливость и надежность устройства, особенно в режиме работы транзистора при высоком токе и высокой температуре.

Управление PT IGBT Power MOS 7 очень похоже на управление традиционными полевыми МОП-транзисторами. При прямой замене полевых транзисторов устройствами PT IGBT Power MOS 7 в высокочастотных применениях можно использовать те же уровни, даже если они составляют всего 10 В. В этих случаях рекомендуемые значения управляющего напряжения затвора для уменьшения потерь при включении составляют 12–15 В — как для биполярных транзисторов с изолированным затвором, так и для полевых МОП-транзисторов.

### Потери на переключение и потери проводимости

Динамические характеристики включения биполярных транзисторов с изолированным затвором практически идентичны характеристикам полевых МОП-транзисторов. При выключении есть различия, связанные с наличием «хвостового» тока. Подавить «хвостовой» ток полностью не удастся, и поэтому у IGBT импульсная энергия выключения намного больше энергии включения. Стремление получить высокие динамические характеристики и сокращение потерь на переключение приводит к росту потерь проводимости, поэтому перед разработчиками часто стоит проблема выбора оптимального соотношения. Чтобы уменьшить потери проводимости, импульсная энергия должна увеличиваться и наоборот, а снижение напряжения приводит к росту потерь на переключение.

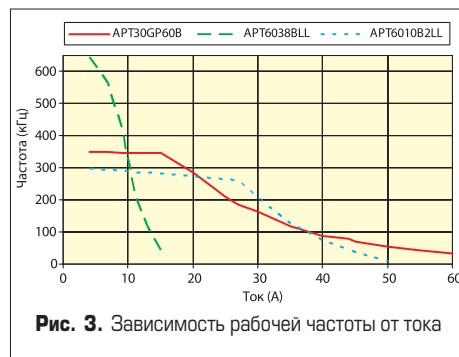
Рис. 2 изображает выбор оптимального соотношения между импульсной энергией выключения  $E_{off}$  и напряжением коллектор-эмиттер в открытом состоянии транзистора  $V_{CE(on)}$ . Представлены зависимости для двух поколений IGBT: характеристика предыдущего поколения IGBT и характеристика PT IGBT Power MOS 7. При использовании устройств нового поколения PT IGBT удается снизить энергию выключения на 30–50% без значительного увеличения  $V_{CE(on)}$ . Результатом этого является повышение КПД в импульсных источниках питания, использующих PT IGBT новой технологии Power MOS 7.



### Рабочие частоты и токи

Одним из самых удобных методов сравнения производительности различных устройств, таких, например, как IGBT и полевые МОП-транзисторы, является зависимость рабочей частоты от тока. Удобство метода заключается в том, что можно увидеть не только потери проводимости, но и потери на переключение, а также оценить тепловое сопротивление.

На рис. 3 изображены кривые зависимости частоты и тока для трех устройств: одного PT IGBT и двух мощных полевых МОП-транзисторов. Все три устройства являются устройствами нового поколения Power MOS 7 производства APT.



APT30GP60B — это биполярный транзистор с изолированным затвором нового семейства PT IGBT Power MOS 7 с рабочим напряжением 600 В и номинальным значением прямого тока  $I_{C2}$  49 А в корпусе TO-247. Устройства APT6038BLL и APT6010B2LL — это полевые МОП-транзисторы Power MOS 7 с рабочим напряжением 600 В и номинальными значениями прямых токов  $I_D$  17 и 54 А соответственно. Транзистор APT6038BLL выполнен в корпусе TO-247, а APT6010B2LL — в корпусе T-MAX (схожий с TO-247).

В качестве условий тестирования были выбраны следующие параметры: режим жесткого переключения с индуктивной нагрузкой, рабочее напряжение 400 В, температура перехода  $T_j$  — 175 °С, температура корпуса  $T_c$  — 75 °С, рабочий цикл 50% и общее сопротивление затвора 5 Ом. Совместно с каждым устройством в качестве фиксирующего использовался диод сверхбыстрого восстановления на 15 А и 600 В. Тестируемая схема представляла собой типовую топологию для индуктивных нагрузок.

Устройства APT30GP60B и APT6038BLL имеют одинаковые размеры кристалла, а размер кристалла APT6010B2LL примерно в 3 раза больше. Обычно стоимость устройства зависит от площади кристалла, поэтому устройства с требуемыми характеристиками, построенные на меньшем по площади кристалле, стоят, как правило, дешевле.

Предположим, что нам необходимо обеспечить импульсный ток 8 А на частоте 200 кГц. Исходя из зависимостей на рис. 3, становится ясно, что полевой МОП-транзистор APT6038BLL — наилучший выбор, так как он может работать со значительно большими частотами, чем другие устройства. Теперь предположим, что требуется обеспечить ток 20 А на частоте 200 кГц. Такой ток будет способен

обеспечить как PT IGBT APT30GP60B, так и полевой МОП-транзистор APT6010B2LL. Однако PT IGBT APT30GP60B будет стоить в три раза меньше, чем транзистор APT6010B2LL, в связи с уменьшенным размером кристалла. Полевой МОП-транзистор APT6038BLL полностью отпадает. При токе выше 37 А PT IGBT имеет все преимущества, даже не смотря на то, что обладает меньшим размером кристалла. При таких рабочих частотах температура перехода IGBT будет ниже, чем у полевого МОП-транзистора. Этот пример идет вразрез с общепринятым мнением, что полевые МОП-транзисторы всегда работают эффективнее, чем IGBT, и высокая эффективность подразумевает высокую стоимость.

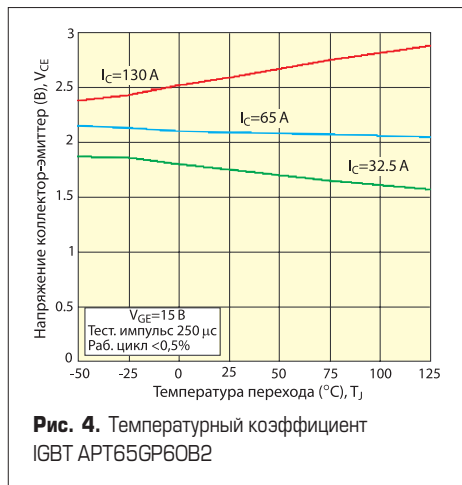
Для более корректного анализа стоит сделать еще несколько замечаний.

Во-первых, значение прямого тока  $I_D$  полевого МОП-транзистора APT6038BLL составляет 17 А, но в нашем случае этот транзистор вряд ли сможет обеспечить ток более 10 А. При других условиях, таких, например, как короткий рабочий цикл, транзистор сможет обеспечить прямой ток, близкий к номинальному значению. Номинальное значение прямого тока не может показать нам реальное значение тока для нашего применения, так как измеряется оно в непрерывном режиме (без потерь на переключение) и при определенной температуре. В основном номинальное значение прямого тока показывает относительную величину тока и потери проводимости в устройстве.

Во-вторых, общее сравнение показывает, что значение прямого тока  $I_D$  полевого МОП-транзистора APT6010B2LL (при непрерывном режиме с температурой корпуса 25 °С) близко к значению прямого тока  $I_{C2}$  IGBT APT30GP60B (при непрерывном режиме с температурой корпуса 110 °С) — 54 и 49 А соответственно. Эти характеристики весьма схожи между собой, производительность этих двух устройств тоже практически одинаковая. Оба устройства могут работать на частоте 200 кГц при рабочих токах, в полноту меньших номинального значения тока.

В-третьих, биполярные транзисторы обладают большей плотностью тока, чем полевые МОП-транзисторы, благодаря чему IGBT используют кристаллы меньшего размера с тем же уровнем мощности, что и МОП-транзисторы. Из-за значительного увеличения сопротивления в открытом состоянии полевые МОП-транзисторы обладают гораздо меньшей плотностью тока при рабочих напряжениях свыше 300 В. И здесь гораздо целесообразнее использовать IGBT.

В завершении надо отметить, что необходимо понимание относительной эффективности того или иного устройства при применении в различных условиях. На высоких частотах и сравнительно низких токах предпочтение отдается, как правило, полевым МОП-транзисторам (или же PT IGBT малых размеров). IGBT является лучшим решением в применениях, где требуется больший ток, так как потери проводимости умеренно увеличиваются с увеличением тока, в то время как значения потерь проводимости мощного



полевого МОП-транзистора пропорциональны квадрату значения тока. В большинстве частотных и токовых диапазонов могут применяться различные устройства, однако последнее поколение PT IGBT Power MOS 7 выступает как самое недорогое решение.

### Температурные эффекты

Скорость включения в импульсном режиме работы и потери для биполярных транзисторов с изолированным затвором и полевых МОП-транзисторов практически не зависят от температуры. Между тем, в режиме жесткого переключения обратный ток восстановления диода увеличивается с увеличением температуры, что увеличивает потери на переключение. Скорость выключения полевых МОП-транзисторов также, в сущности, не связана с температурой, но скорость выключения IGBT ухудшается и потери на переключение, соответственно, увеличиваются с ростом температуры. Тем не менее в транзисторах PT IGBT Power MOS 7 потери сохраняются практически на прежнем уровне благодаря контролю над временем жизни неосновных носителей.

Одним из основных недостатков обычных IGBT-транзисторов является отрицательный температурный коэффициент (ТК) по напряжению насыщения ( $V_{CE(on)}$ ), что нарушает баланс токов при параллельном соединении транзисторов.

На рис. 4 представлены зависимости, характеризующие температурный коэффициент IGBT APT65GP60B2.

Из рисунка видно, что температурный коэффициент слегка меняется в зависимости от тока коллектора — от отрицательного значения при токе меньше 65 А (нулевому ТК соответствует ток 75 А — на рисунке не показан) до положительного при токе

больше 75 А. На это свойство специально был сделан упор при разработке PT IGBT Advanced Power Technology Power MOS 7 нового поколения. Данное свойство позволяет достаточно просто осуществлять параллельное включение устройств.

В отличие от PT IGBT полевые МОП-транзисторы обладают жестким положительным температурным коэффициентом, что приводит к потере проводимости при соединении более чем двух устройств при условии их работы в температурном диапазоне 25–125  $^{\circ}\text{C}$ .

### Применение в системах импульсных источников питания (SMPS)

#### Усилительный преобразователь в режиме жесткого переключения

На рис. 5 дано сравнение зависимостей рабочей частоты и прямого тока устройств PT IGBT APT15GP60B ( $I_{C2} = 27 \text{ А}$ ) и полевого МОП-транзистора APT6029BLL ( $I_D = 21 \text{ А}$ ). Условия были выбраны те же, что и ранее: режим жесткого переключения с индуктивной нагрузкой, рабочее напряжение 400 В, температура перехода  $T_j$  — 175  $^{\circ}\text{C}$ , температура корпуса  $T_C$  — 75  $^{\circ}\text{C}$ , рабочий цикл 50% и общее сопротивление затвора 5 Ом. Совместно с каждым устройством в качестве фиксирующего использовался диод сверхбыстрого восстановления на 15 А и 600 В. Из приведенных зависимостей видно, что каждое устройство может работать с частотой 200 кГц и током 14 А. При увеличении токов более привлекательным становится использование IGBT, так как при этом его рабочая частота выше, чем полевого МОП-транзистора. IGBT APT15GP60B обладает меньшими размерами кристалла, и поэтому дешевле. При значениях тока ниже 14 А полевой МОП-транзистор может работать с более высокой частотой, и это означает, что использование полевого МОП-транзистора в этих условиях эффективнее, чем использование IGBT.

#### Фазосдвигающий мост

На рис. 6 приведена зависимость максимальной рабочей частоты и тока для устройств, схожих с предыдущими. APT6029BFLL — это транзистор из семейства FREDFET (полевой МОП-транзистор со встроенным быстрым диодом), а APT15GP60BDF1 — COMBI IGBT (IGBT со встроенным диодом быстрого восстановления). Оба устройства могут использоваться в построении мостовых схем.

Анализируемая схема представляет собой ключ нулевого напряжения, что характерно для режима жесткого переключения. Из рис. 6 видно, что кривые зависимости частоты от тока

просто смещены в область более высоких значений тока, если сравнивать с рис. 5 для усиленного преобразователя в режиме жесткого переключения. На самом деле необходимо отметить, что кривые IGBT смещены дальше, чем кривые полевого МОП-транзистора. Это обусловлено тем, что IGBT обладает меньшими потерями проводимости, чем полевой МОП-транзистор. При рабочем токе выше 13 А основные потери полевого МОП-транзистора обусловлены потерями проводимости. При значении тока 15 А у полевого МОП-транзистора APT6029BLL теряется 75 Вт мощности в связи с потерями проводимости, в то время как у PT IGBT APT15GP60BDF1 — около 14 Вт. Потери на переключение преобладают над потерями проводимости IGBT вплоть до уровня рабочего тока 40 А. При токе выше 40 А потери проводимости IGBT становятся больше, чем потери на переключение.

Когда значение рабочей частоты ниже 300 кГц, IGBT обладает преимуществом режима мягкого включения в схеме фазосдвигающего моста, так как допустимое максимальное значение рабочего тока больше, чем у полевого МОП-транзистора. Малые потери на переключение IGBT в результате мягкого переключения дополнены малыми потерями проводимости. Таким образом, семейство Power MOS 7 PT IGBT находит свое применение как в схемах мягкого, так и жесткого переключения.

### Заключение

Новое поколение транзисторов с изолированным затвором PT IGBT Power MOS 7 производства Advanced Power Technology обладает совокупностью значительно улучшенных динамических характеристик, малыми потерями проводимости и универсальной способностью мягкого переключения. Дополняя эти преимущества немаловажным фактором — невысокой стоимостью — новое поколение транзисторов PT IGBT Power MOS 7 действительно может заменить полевые МОП-транзисторы в применениях импульсного электропитания. Теперь уже трудно сказать, насколько долго продержатся высоковольтные полевые МОП-транзисторы в составе устройств питания. Скорее всего, в будущем биполярные транзисторы с изолированным затвором займут их место.

### Литература

1. Latest Technology PT IGBTs vs. Power MOSFETs. Application Note APT0302 Rev. A. 04-04-2003.

